

## بررسی نفوذپذیری، جذب مویینه آب و کاهش وزن در بتن ژئوپلیمری حاوی سرباره کوره آهن گدازی، نانوسیلیس و الیاف پلی اولفین

محمدحسین منصورقناعی

دانشجوی دکتری عمران سازه، گروه مهندسی عمران، واحد چالوس، دانشگاه آزاد اسلامی، چالوس، ایران.

مرتضی بیک لریان\*

گروه مهندسی عمران، واحد چالوس، دانشگاه آزاد اسلامی، چالوس، ایران.

علیرضا مردوخ پور

گروه مهندسی عمران، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران.

### چکیده

عوارض محیط‌زیستی و مصرف بالای سوخت‌های فسیلی در فرایند تولید سیمان معمولی موجب گردید تا دانشمندان به فکر یافتن ماده‌ای جایگزین برای سیمان در بتن باشند، در این راستا در چند دهه اخیر تولید بتن ژئوپلیمری به‌عنوان ماده‌ای نوین در صنعت سازه‌ای مورد توجه محققین قرار گرفت، در تولید این نوع از بتن مواد آلومینوسیلیکاتی و محلول قلیافعال جایگزین سیمان و آب می‌شود و بتنی با مقاومت و استحکام فراتر از بتن معمولی را تولید می‌نمایند. در این مقاله به بررسی آزمایشگاهی خواص دوام بتن ژئوپلیمرسرباره‌ای حاوی ۰ الی ۸ درصد نانوسیلیس و ۱ الی ۲ درصد الیاف پلی اولفین پرداخته شده است، نمونه‌های بتنی ساخته‌شده در سنین ۷ و ۹۰ روزه تحت آزمون‌های نفوذپذیری آب، جذب مویینه آب و کاهش وزن قرار گرفتند، همچنین به‌منظور بررسی ریزساختاری نمونه‌ها از طیف-سنجی XRF و استفاده گردید. نتایج حاصله حاکی از بهبود عملکرد نمونه‌های بتنی با افزودن نانوذرات سیلیس و الیاف پلی اولفین نسبت به نتایج حاصل از بتن حاوی سیمان پرتلند بود، بررسی‌های ریزساختاری نیز نتایج بدست آمده را مورد تأیید قرار داد. بهترین عملکرد در نتایج آزمون‌های نفوذپذیری و جذب مویینه آب متعلق به سن عمل آوری ۹۰ روزه بتن ژئوپلیمری (حاوی ۸٪ نانوسیلیس و ۲٪ الیاف) بود که به ترتیب به میزان ۵۶٪ و ۶۵٪ بهبود را نسبت به بتن کنترل به‌خود اختصاص داد و نمونه بتن ژئوپلیمری حاوی ۹۲٪ سرباره و ۸٪ نانوسیلیس دارای کمترین مقدار کاهش وزن به میزان ۶٪ بعد از اعمال حرارت بالا را کسب کردند.

واژه‌های کلیدی: بتن ژئوپلیمری، سرباره کوره آهن گدازی، نانوسیلیس، الیاف پلی اولفین، کاهش وزن.

\* نویسنده مسئول: m.biklaryan@iauc.ac.ir

## ۱- مقدمه

بالاتری نسبت به ژل C-A-S-H می باشد [۱۳]. افزایش سن عمل-آوری [۱۴] و عمل آوری حرارتی<sup>۱۱</sup> [۱۵] در SGPC، آثار مثبتی بر مقدار حجم تولید ژل های هیدراته در ترکیب بتن دارد.

در سال های اخیر کاربرد نانوذرات سیلیس برای بهبود خواص بتن، چشم انداز گسترده ای در برابر علم تکنولوژی بتن ایجاد کرده است [۱۶]. نانو ذرات به علت اندازه ذرات بسیار کوچک و سطح ویژه بالای آنها، خصوصیات ویژه ای را در طرح مخلوط بتن از خود نشان داده اند [۱۷]. همچنین نانوسیلیس به دلیل اندازه کوچک ذرات خود می تواند با پر کردن خلل و فرج های باقی مانده در بتن، باعث بهبود استحکام آن شود و به عنوان یک مکمل در ساخت بتن به کار رود [۱۸]. در این راستا تحقیقات نشان داده است که به کارگیری نانومواد (نظیر نانوسیلیس) سرشار از ذرات آلومینات و سیلیکات در ترکیب بتن ژئوپلیمر سرباره ای منجر به بهبود خواص مکانیکی و دوام در این نوع از بتن می گردد [۱۹]. نانومواد با خواص پوزولانی، ضمن تسریع فرایند ژئوپلیمریزاسیون در ترکیب بتن ژئوپلیمری، حجم بالاتری از ژل های هیدراته شده را در فرایند ژئوپلیمریزاسیون تولید می نمایند. در این راستا تحقیقات نشان می دهد که افزودن نانومواد در ترکیب بتن ژئوپلیمری مانع از رشد ترک شده و با کاهش حجم خلل و فرج موجود در ترکیب، منجر به افزایش تراکم و بهبود استحکام در این نوع از بتن ها می گردد [۲۰-۲۵].

از اهداف نوآورانه در این پژوهش آزمایشگاهی، تولید بتنی با خواص دوام و ریزساختاری برتر نسبت به بتن معمولی است، در این راستا بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره کوره آهن گدازی که حاوی نانوذرات سیلیس و الیاف پلی اولفین است تحت آزمون های نفوذپذیری آب، جذب مویینه آب، کاهش وزن، طیف سنجی XRF و SEM قرار گرفت. در راستای تولید این نوع از بتن، کاهش مصرف انرژی، کاهش مصرف منابع خام معدنی و کاهش تولید گاز سمی CO<sub>2</sub>، ناشی از عدم مصرف سیمان پرتلند (این موارد از عوارض تولید سیمان پرتلند است) در بتن ژئوپلیمری، از

در چند دهه اخیر، بتن های ژئوپلیمری (GPC)<sup>۱</sup> در راستای کاهش تولید گاز سمی دی اکسید کربن (CO<sub>2</sub>) [۱]، کاهش مصرف مواد خام معدنی [۲] و کاهش مصارف بالای انرژی، طی فرایند تولید سیمان پرتلند معمولی (OPC)<sup>۲</sup>، به عنوان بتنی نوظهور [۳]، پایدار در صنعت ساختمانی [۲] و جایگزینی مناسب برای بتن های حاوی سیمان پرتلند معمولی (OPCC)<sup>۳</sup> [۴،۵] مطرح گردید. از طرفی بتن های ژئوپلیمری نسبت به بتن های معمولی دارای نفوذپذیری کم [۶] و مقاومت بالا در برابر حمله سولفات ها و اسیدها هستند [۷]. ساختار بتن ژئوپلیمری در ابتدا توسط جزف دیویدویتس در سال ۱۹۷۹ مورد تحقیق و بررسی قرار گرفت [۸].

به ازای تولید هر تن فولاد، حدود ۴۰۰ کیلوگرم سرباره کوره فولادی شامل سرباره کوره آهن گدازی (GBFS)<sup>۴</sup> و سرباره پایه اکسیژن کوره (BOFS)<sup>۵</sup> تولید می گردد [۹]. GBFS به عنوان یک زباله صنعتی شناخته می شود که به دلیل کاربردهای ناشناخته، معمولاً در محل های دفن زباله رها می شوند و منجر به آلودگی محیط زیست پیرامون خود می گردند [۱۰]. اما این محصول فرعی کارخانه تولید فولاد، حاوی مقادیر زیادی از مواد سیلیسی (Si) و آلومیناتی (Al) است که مصرف آنها در ترکیب بتن، می تواند ضمن تاثیر مثبت بر سرعت فرایند ژئوپلیمریزاسیون [۱۰]، منجر به کاهش تخلخل [۱۱] و بهبود عملکرد چسبندگی در بتن سخت شده می گردد [۱۲]. این ویژگی بیشتر به دلیل تولید حجم بالاتری (نسبت به بتن معمولی) از ژل های هیدراته نظیر C-S-H<sup>۶</sup>، A-S-H<sup>۷</sup>، C-A-S-H<sup>۸</sup> و N-A-S-H<sup>۹</sup> در ترکیب بتن ژئوپلیمری حاوی سرباره کوره آهن گدازی (SGPC)<sup>۱۰</sup> است، این ژل ها عامل اصلی ایجاد مقاومت و دوام در بتن سخت شده هستند. تفاوت این ژل ها در ساختار، اندازه و ویژگی های عملکردی هر یک در ماتریس بتن ژئوپلیمری است. در این راستا تحقیقات نشان داده است که ژل C-A-S-H دارای درجه بالاتری از نظم ساختاری نسبت به ژل N-A-S-H است، در حالی که ژل N-A-S-H دارای پلیمریزاسیون

<sup>۱</sup> Calcium-Aluminat- Sulfate-Hydrate (C-A-S-H) or Ettringite Gel or Tobermorite-like gel

<sup>۹</sup> Natrium-Aluminat- Sulfate -Hydrate (N-A-S-H) Or Tobermorite-like gel

<sup>۱۰</sup> Slag Geopolymer Concrete (SGPC)

<sup>۱۱</sup> Thermal Curing

<sup>۱</sup> Geopolymer Concrete (GPC)

<sup>۲</sup> Ordinary Portland Cement (OPC)

<sup>۳</sup> Ordinary Portland Cement Concrete (OPCC)

<sup>۴</sup> Granulated Blast Furnace Slag (GBFS)

<sup>۵</sup> Basic Oxygen Furnace Slag (BOFS)

<sup>۶</sup> Calcium-Silicate Hydrate (C-S-H) or Tobermorite Gel

<sup>۷</sup> Aluminum-Silicate-Hydrate (A-S-H) or Tobermorite Gel

است. برخی از خصوصیات ریزدانه و درشت دانه مصرفی که تحت استاندارد ASTM C33 [۳۰] دانه بندی و مصرف گردیده در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳- مشخصات سنگدانه ها

مصالح دانه ای بتن	شن	ماسه
حداقل قطر	۴/۷۵ (mm)	۷۵ (nm)
حداکثر قطر (mm)	۱۹	۴/۷۵
چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	۲۷۵۰	۲۶۵۰

الیاف مصرفی در این تحقیق از نوع پلی اولفین بوده که تحت استاندارد ASTM D7508/D7508M [۳۱] مورد استفاده در بتن قرار گرفته است، برخی از مشخصات فیزیکی و مکانیکی این نوع از الیاف در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول ۴- مشخصات الیاف پلی الفین

چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	۹۲۰
مقاومت کششی (N/mm <sup>2</sup> )	۵۰۰
طول (mm)	۳۰
قطر (mm)	۰/۸

صنایع مرتبط با بتن، با الیاف مبتنی بر پلی اولفین بیشترین کاربرد را دارند [۳۲]. برروان کننده مصرفی در این تحقیق از نسل چهارم بر پایه پلی کربوکسیلات نرمال بوده و از شرکت دوروچم ایتالیا خریداری شده است، این ماده جهت جبران ضعف کارایی و حفظ روانی ترکیب ملات در بتن استفاده می گردد. تحقیقات نشان داده است که بتن ژئوپلیمری تازه به علت لزجت بالا موجود در محلول قلیا فعال در مقایسه با بتن حاوی سیمان پرتلند معمولی تازه، کارایی ضعیف تری دارند، جهت حل این مشکل یک فوق روان کننده مبتنی بر پلی کربوکسیلات اغلب به علت پیوندهای قوی مابین کلسیم با بار مثبت و پلی کربوکسیلات با بار منفی، بهترین گزینه است [۳۳]. محلول قلیا فعال مصرفی در این تحقیق ترکیبی از محلول سیلیکات سدیم<sup>۱</sup> و هیدروکسید سدیم<sup>۲</sup> با نسبت وزنی ۲/۵ می باشد که با چگالی ترکیبی برابر ۱۴۸۳ kg/m<sup>3</sup> مورد استفاده قرار گرفته است. مشخصات هر یک از این محلول های قلیایی به طور جداگانه در جدول ۵ به نمایش درآمده است. استفاده ترکیبی از

اهداف دیگر در این تحقیق معرفی می گردد.

## ۲- ساخت نمونه و برنامه آزمایشگاهی

### ۲-۱- مصالح مصرفی

در این پژوهش آزمایشگاهی، سرباره کوره آهن گدازی تحت استاندارد ASTM C989/C989M [۲۶] مورد مصرف قرار گرفت، مشخصات فیزیکی و مکانیکی سرباره کوره آهن گدازی در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی و مکانیکی سرباره کوره آهن گدازی

چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	۲۷۹۰
سطح مخصوص (Cm <sup>2</sup> /g)	۲۲۰۰
چگالی ظاهری (kg/m <sup>3</sup> )	۹۶۰
اندازه ذرات (μm)	۲/۱

تحقیقات نشان دهنده این موضوع می باشد که سرباره کوره آهن گدازی متشکل از سیلیکات کلسیم و آلومینات (تقریباً ۹۰ درصد) الزامات مربوط به مواد پوزولانی را برآورده می سازد [۲۶]. نانوسیلیس مصرفی تحت استاندارد ASTM C1240 [۲۵] در بتن به کار گرفته شده است، مشخصات فیزیکی و مکانیکی نانوسیلیس مصرفی در ترکیب بتن ژئوپلیمری در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲- مشخصات فیزیکی و مکانیکی نانوسیلیس

چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	۲۴۰۰
قطر ذرات (nm)	۱۴ ال ۱۷
اندازه ذرات (nm)	۶۰ ال ۲۰
خلوص	٪ ۹۹/۸

مصرف نانوسیلیس باید به صورت بهینه باشد زیرا تحقیقات نشان داده است که بار ریزتر شدن اندازه نانوذرات در مخلوط بتن، به جای این که آنها با آب و سایر مصالح واکنش دهند به همدیگر می چسبند و تشکیل کلوخه های نانومتری را می دهند در نتیجه این ذرات در مخلوط نمی توانند پراکنده شوند و در مرحله واکنش پذیر می مشارکت نمایند [۲۹]. سیمان مصرفی از نوع پرتلند تیپ ۲ دیلمان می باشد که تحت استاندارد En 197-1 تولید گردیده

<sup>۱</sup> NaOH

<sup>۲</sup> Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>

هیدرواکسید سدیم و سیلیکات سدیم به علت شکل گیری مقادیر بیشتری از سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) در هنگام استفاده از سیلیکات کلسیم، منجر به استحکام بالاتری نسبت به حالت استفاده تنها از هیدرواکسید کلسیم می شود [۳۳].

هیدرواکسید سدیم به نسبت تعیین شده (در این پژوهش ترکیب سیلیکات سدیم به هیدرواکسید سدیم با نسبت ۲/۵ است) ترکیب شده و در مخلوط بتن مورد استفاده قرار گیرد.

جدول ۵- مشخصات مخلوط قلیا فعال

نوع مخلول	سیلیکات سدیم	هیدرواکسید سدیم
فرمول مولکولی	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	NaOH
مولاریته (mol/m <sup>3</sup> )	۱۲	۱۲
چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	۲۴۰۰	۲۱۳۰
دمای ذوب (C)	۱۰۸۸	۳۱۸
جرم مولی (g/mol)	۱۲۲/۰۶	۳۹/۹۹
رنگ	خاکستری	خاکستری
نسبت سیلیکات سدیم به هیدرواکسید سدیم		
۲/۵		

جهت تهیه هیدرواکسید سدیم: عدد ۳۹/۹۹ گرم بر مول (که وزن ۱ مول هیدرواکسید سدیم یا وزن مولی است) را ضربدر عدد مولاریته مورد نظر (در این پژوهش ۱۴ است) می کنیم تا وزن هیدرواکسید جامد مصرفی به دست آید، سپس این وزن از

## ۲-۲- طرح مخلوط

استاندارد مجزایی برای طرح مخلوط بتن ژئوپلیمری وجود ندارد، در این تحقیق به منظور بررسی خواص دوام بتن کنترل و بتن ژئوپلیمر سرباره ای حاوی نانوسیلیس و الیاف پلی اولفین، ۶ طرح مخلوط با نسبت های مختلف مصالح مطابق جدول ۶ تحت توصیه کمیته ACI 211.1-89 [۳۴] تهیه گردید. در این راستا تعداد ۱۱۴ نمونه بتنی تهیه شد و در سنین عمل آوری ۷ و ۹۰ روزه مورد آزمایش قرار گرفتند. برای انجام XRF و SEM از نمونه های شکسته شده استفاده گردید.

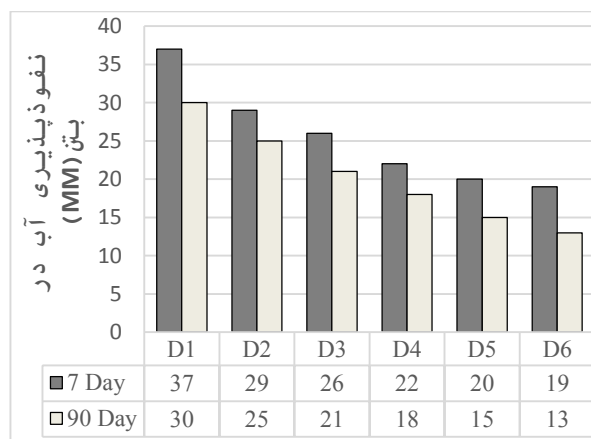
جدول ۶- مشخصات طرح مخلوط بتن (براساس جرم)

شماره طرح	نوع بتن	سیمان	آب	مخلول قلیایی	سرباره	kg/m <sup>3</sup>				
						الیاف	شن	ماسه	ابرروان کننده	
۱	پرتلند	۴۵۰	۲۰۲/۵	۰	۰	۰	۰	۰	۶/۷۵	شرایط عمل آوری پس از قالب برداری
۲	ژئوپلیمری	۰	۰	۲۰۲/۵	۴۵۰	۰	۰	۰	۶/۷۵	اتاق (بعد حرارت ۶۰ درجه ۴۸ ساعته)
۳	ژئوپلیمری	۰	۰	۲۰۲/۵	۴۳۲	۱۸	۰	۰	۷/۸	اتاق (بعد حرارت ۶۰ درجه ۴۸ ساعته)
۴	ژئوپلیمر	۰	۰	۲۰۲/۵	۴۱۴	۳۶	۰	۰	۸/۳	اتاق (بعد حرارت ۶۰ درجه ۴۸ ساعته)
۵	ژئوپلیمری	۰	۰	۲۰۲/۵	۴۳۲	۳۶	۹/۲	۰	۸/۶	اتاق (بعد حرارت ۶۰ درجه ۴۸ ساعته)
۶	ژئوپلیمری	۰	۰	۲۰۲/۵	۴۳۲	۳۶	۱۸/۴	۰	۹	اتاق (بعد حرارت ۶۰ درجه ۴۸ ساعته)

ارزیابی قرار گیرد. در طرح های مخلوط این پژوهش، درصد های تعیین شده برای مصالح مصرفی با توجه به استانداردها (طرح مخلوط و مصالح مصرفی) و مطالعه و بررسی تحقیقات آزمایشگاهی سایر محققین پیرامون موضوع این مقاله انتخاب

طرح ۴ از بین طرح های ۲، ۳ و ۴ به عنوان طرح بهینه پس از بررسی نتایج اولیه آزمون ها انتخاب گردید و در ادامه با افزودن ۱ و ۲ درصد از الیاف پلی اولفین به این طرح، طرح های ۵ و ۶ تهیه شدند تا نقش الیاف بر خواص دوام و کاهش وزن نمونه های بتنی مورد

طرح مخلوط در هر سن عمل آوری ۴ نمونه مورد آزمون قرار گرفت) با ابعاد مکعبی ۱۲×۲۰×۲۰ سانتی متر تحت استاندارد BS EN 12390-8 [۳۷] در سنین عمل آوری ۷ و ۹۰ روزه انجام گرفت. براساس این استاندارد در سن عمل آوری تعیین شده، نمونه‌های بتنی از چهار وجه با چسب آکواریوم ضد آب گردیدند و تنها از دو وجه پایین و بالا به منظور انجام فرآیند آزمایش آزاد باقی ماندند. پس از جانمایی نمونه‌ها در قالب دستگاه تعیین عمق نفوذ آب، مطابق استاندارد ذکر شده نمونه‌ها به مدت ۷۲±۲ ساعت تحت فشار آب ۵۰±۵۰ کیلو پاسکال قرار گرفتند. در طول دوره آزمایش، فشار آب بر نمونه‌ها کنترل گردید، پس از سپری شدن مدت زمان تعیین شده، نمونه‌ها شکسته شدند و عمق نفوذ آب در ارتفاع نمونه بتنی اندازه‌گیری گردید. نتایج حاصل از آزمون نفوذپذیری آب در بتن مطابق نمودار شکل ۱ ارائه گردیده است.



شکل ۱- نتایج آزمایش نفوذپذیری آب در بتن

براساس این نتایج، مشاهده می‌گردد که در تمام طرح‌های مخلوط، با افزایش سن عمل آوری بتن، میزان نفوذ آب در بتن کاهش پیدا می‌کند، این امر را می‌توان نتیجه پیشرفت فرایند هیدراتاسیون<sup>۱</sup> و ژئوپلیمریزاسیون<sup>۲</sup> در خمیر سیمان بتن کنترل و بتن ژئوپلیمری دانست که منجر به افزایش تراکم و نفوذناپذیری بیشتر در نمونه بتنی گردیده است، ارتفاع پایین نفوذ آب در بتن نشانه چگالی و تراکم بالا در ماتریس سیمان ژئوپلیمری می‌باشد که منجر به بهبود دوام بتن در مجاورت با آب گردیده است. در این راستا، نتایج حاصله نشان می‌دهد که برای بتن ژئوپلیمری میزان نفوذپذیری آب در سنین عمل آوری ۷ و ۹۰ روزه برای تمام طرح‌های مخلوط،

گردیده است. در این راستا نسبت آب به سیمان در بتن کنترل و محلول قلیا فعال به سرباره کوره آهن‌گدازی در بتن ژئوپلیمری به طور ثابت ۰/۴۵ در نظر گرفته شده است و مقادیر سیمان و یا سرباره کوره آهن‌گدازی، آب و یا محلول قلیا فعال، شن و ابروان کننده ثابت در نظر گرفته شده‌اند و با تعیین وزن الیاف (با توجه به درصد چگالی خودش)، مقدار ماسه به عنوان متغیر محاسبه و تعیین گردید.

### ۳-۲- نحوه ساخت و عمل آوری نمونه‌ها

در این تحقیق، ساخت نمونه‌ها در محیط آزمایشگاه انجام گرفت، در این راستا، ابتدا مصالح براساس جداول ۶ طرح مخلوط توزین شدند، در ادامه مصالح خشک داخل مخلوط‌کن برقی در حال گردش طی چند مرحله به آرامی ریخته شدند و در مجموع مصالح خشک حدود ۳ دقیقه با هم ترکیب شدند، سپس ابروان‌ساز، آب و محلول قلیا فعال به فراخور هر طرح (براساس جدول ۶)، به مخلوط‌ها اضافه گردیدند و به مدت ۳ دقیقه دیگر فرایند مخلوط شدن به طول انجامید. پس از اتمام مرحله مخلوط شدن مصالح، بتن کنترل و بتن ژئوپلیمری داخل قالب‌های از قبل روغن کاری شده ریخته شدند و عمل تراکم برای هر نمونه در سه مرحله و هر بار با ۲۵ ضربه میله انجام گرفت. در ادامه نمونه‌ها ۲۴ ساعت پس از بتن‌ریزی در دمای اتاق (۲۰ الی ۲۵ درجه سلسیوس) نگهداری شدند و پس از قالب‌برداری، نمونه‌های بتن کنترل در داخل حوضچه آب‌آهک با دمای اتاق تا سن انجام آزمایش نگهداری شدند و برای بتن ژئوپلیمری نمونه‌ها پس از قالب‌برداری به منظور افزایش تراکم و بهبود خواص دوام، در کوره به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۶۰ درجه سلسیوس تحت عمل آوری حرارتی قرار گرفتند و در ادامه تا سن انجام آزمایش در جای خشک تحت دمای اتاق نگهداری شدند. تحقیقات نشان داده است که عمل آوری حرارتی در بتن‌های ژئوپلیمری بر پایه سرباره کوره آهن‌گدازی منجر به بهبود خصوصیات در این نوع از بتن می‌گردد [۳۶-۳۵].

### ۳-۳- آزمون‌های بتن

#### ۳-۱- آزمایش نفوذپذیری آب در بتن

آزمایش نفوذپذیری آب در بتن بر روی ۴۸ نمونه بتنی (برای هر

<sup>2</sup> Geopolymerization

<sup>1</sup> Hydration

تحقیقات نشان داده است که جنس، اندازه و سایر خواص مکانیکی و شیمیایی الیاف مصرفی در ترکیب بتن می تواند نقش بسزایی در توسعه ساختار و دوام بتن ایفا نماید. در این راستا، ژانگ و همکاران معتقدند که الیاف با پراکندن شدن در داخل بتن می توانند باعث اصلاح ساختار بتن گردند [۳۹]. در شکل ۲ نمونه بتنی در حال اندازه گیری ارتفاع نفوذ آب را نشان می دهد.



شکل ۲- نمونه بتنی پس از نفوذپذیری آب

### ۲-۳- آزمایش جذب مویینه آب در بتن

منافذ مویینه فضاهایی هستند که با توده مواد جامد در قسمت جامد خمیر سیمان پر نشده اند، وقتی بتن در مجاورت با آب قرار می گیرد این فضاها مستعد جذب و انتقال آب به داخل نمونه های بتنی هستند. در تحقیق پیش رو، آزمون جذب مویینه آب در بتن بر روی ۴۸ نمونه بتنی (هر آزمون شامل ۴ نمونه) با ابعاد دیسکی ۱۰×۵ سانتی متر تحت استاندارد ASTM C1585-04 [۴۰] در سنین عمل آوری ۷ و ۹۰ روزه انجام پذیرفت.

در این راستا براساس استاندارد ذکر شده ابتدا نمونه های بتنی در سن عمل آوری هدف به مدت ۷۲ ساعت داخل گرمکن با محفظه بسته تحت حرارت  $50 \pm 2$  درجه سلسیوس گرما داده شدند تا نمونه به طور کامل خشک و آب موجود در حفرات مویینه تخلیه گردد، سپس نمونه های خشک شده وزن گردیدند و در ادامه نمونه ها داخل ظرف بر روی شبکه های مش میلگردها به نحوی قرار داده شدند که آب تا ارتفاع  $2 \pm 1$  میلی متر بالاتر از کف نمونه برسد، روی ظرف از پلاستیک پوشانده شد تا از تبخیر آب جلوگیری

کمتر از بتن کنترل در دوره عمل آوری مشابه می باشد و این مطلب نشان از فعالیت پوزولانی بالای سرباره کوره آهن گدازی و نانوسیلیس و نقش چسبندگی و پرکنندگی مناسب این ذرات در مواجهه با حفرات و منافذ موجود در ساختار بتن، همچنین پر شدن فضاهای مویینه بین لایه ای و پیوند مناسب در نواحی انتقال بین سطحی (ITZ) مابین سنگدانه (الیاف) با ملات ژئوپلیمری توسط ژل های هیدراته تولید شده می باشد. در این راستا کمترین مقدار نفوذ آب در بتن متعلق به سن ۹۰ روزه بتن طرح ۶ می باشد که ۵۶ درصد بهبود نسبت به بتن کنترل در همین سن را از خود نشان می دهد.

با افزودن نانوسیلیس تا ۸ درصد به ترکیب بتن ژئوپلیمری مقدار نفوذپذیری آب در بتن کاهش یافته است، این کاهش نفوذ آب در بتن را می توان در نتیجه واکنش پذیری سریع و خصوصیات پوزولانی بالای نانوسیلیس و سرباره کوره آهن گدازی در ترکیب با محلول قلیا فعال و تولید حجم بالایی از ژل های هیدراته از قبیل سیلیکات کلسیم هیدراته، آلومینات کلسیم هیدراته، سولفات-آلومینیم کلسیم هیدراته و سولفات آلومینیم سدیم هیدراته و نقش پرکنندگی این ژل ها در مواجهه با حفرات و چسبندگی بین اجزاء موجود در ریزساختار بتن ژئوپلیمری دانست که منجر به افزایش تراکم ساختار بتن و کاهش عمق نفوذ آب در بتن می گردد. تحقیقات نشان داده است که نفوذپذیری مخلوط های حاوی نانوسیلیس و میکروسیلیس در مقدار بهینه شان به کمینه مقدار خود می رسد و محصولات با سطح ویژه کم، توان بالایی در تولید خوشه های اضافی ژل سیلیکات کلسیم هیدراته دارند [۳۸]. همچنین در تحقیق انجام شده توسط احمد و همکاران بر روی افزودن سه پوزولان سرباره ذوب آهن، سرباره ذوب مس و متاکائولن به بتن، کمترین میزان نفوذپذیری<sup>۱</sup> آب در نمونه های بتنی حاوی ۲۰ درصد پوزولان سرباره ذوب آهن گزارش شده است [۲۹].

افزودن الیاف پلی اولفین در طرح ۵ و ۶ شامل بتن ژئوپلیمری، موجب کاهش ارتفاع نفوذ آب در نمونه های بتنی نسبت به طرح ۴ با درصد مشابه نانوسیلیس و سرباره گردیده است، این مطلب را می توان ناشی از توزیع یکنواخت الیاف پلی اولفین در ملات سیمان ژئوپلیمری و پیوند مناسب خمیر سیمان ژئوپلیمری با الیاف پلی-اولفین در ناحیه انتقال بین سطحی (ITZ) دانست. از طرفی

<sup>1</sup> Permeability

ضعیف ترین عملکرد متعلق به سن عمل آوری ۷ روزه بتن کنترل با ۰/۱۹ میلی متر بر مجذور دقیقه که افزایش جذب مویینه آب به میزان ۶۵ درصد را نسبت به طرح ۶ در همین سن از خود نشان می دهد. تحقیقات نشان داده است که بتن ژئوپلیمری ۹۰ روزه نسبت به بتن معمولی، ۴۰ درصد جذب آب مویینه کمتری دارد که تأثیر واکنش های پوزولانی در پر کردن منافذ از علل این امر می باشد [۴۱]. همچنین براساس تحقیقاتی دیگر پیرامون جذب مویینه آب در بتن ژئوپلیمر سرباره ای، این نوع از بتن به میزان ۲۲ درصد برتری را (در نفوذناپذیری آب) نسبت به بتن معمولی در سن عمل-آوری ۹۰ روزه از خود نشان داد [۴۲].

نتایج در این تحقیق حاکی از این مطلب است که با افزایش نانوسیلیس تا ۸ درصد در ترکیب بتن ژئوپلیمری شاهد بهبود و کاهش نرخ سرعت جذب مویینه آب هستیم، به طوری که در سن عمل آوری ۹۰ روزه، بتن ژئوپلیمری (در طرح ۴) حاوی ۸ درصد نانوسیلیس بهبود عملکرد در نتایج جذب مویینه آب به میزان تقریبی ۲۴ درصد نسبت به بتن ژئوپلیمری (در طرح ۲) فاقد نانوسیلیس را کسب کرد. این امر را می توان در نتیجه کاهش فضاهای خالی در ماتریس ساختار بتن ژئوپلیمری به دلیل تشکیل نقش پرکنندگی ژل های سیلیکات هیدراته حاصل از ترکیب ذرات سرباره کوره آهن گدازی و نانوسیلیس در مجاورت با محلول قلیا فعال دانست.

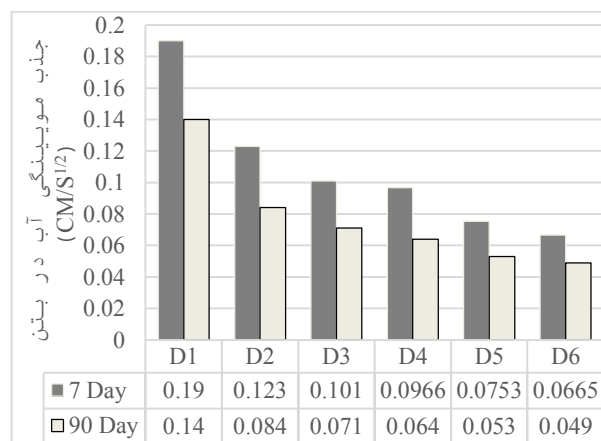
افزودن الیاف پلی اولفین تا ۲ درصد به ترکیب بتن ژئوپلیمری موجب کاهش سرعت جذب مویینه آب در این نوع از بتن گردیده است، به طوری که در سن عمل آوری ۹۰ روزه، بتن ژئوپلیمری (در طرح ۶) حاوی ۲ درصد الیاف، بهبود عملکرد در جذب مویینه آب به میزان ۲۳ درصد فراتر نسبت به بتن ژئوپلیمری (در طرح ۴) فاقد الیاف را از خود نشان داده است، این موضوع نشان از پراکنندگی مناسب الیاف در ترکیب بتن و اتصال مناسب الیاف پلی اولفین با خمیر سیمان ژئوپلیمری می باشد.

### ۳-۳- آزمون کاهش وزن نمونه ها تحت حرارت بالا

به منظور ارزیابی کمی و کیفی خواص مکانیکی دوام در بتن، اثرات حرارت بالا بر کاهش وزن تعداد ۱۸ نمونه (برای هر طرح میانگین نتایج ۳ نمونه) بتنی مورد ارزیابی قرار گرفت. جهت انجام آزمون ذکر شده تحت حرارت بالا، از روش استاندارد ISO834

شود، در ادامه آهنگ بالا روندگی آب از طریق پرشدن حفرات مویینه توسط آب شروع گردید، با توجه به وزن ایجاد شدن نمونه ها در فواصل زمانی تعیین شدن براساس استاندارد در فواصل زمانی ۱۵، ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰، ۱۵۰، ۱۸۰، ۲۴۰، ۳۰۰، ۳۶۰ آب براساس روابط ریاضی محاسبه گردید.

نتایج حاصل از آزمایش جذب مویینگی آب در بتن مطابق نمودار شکل ۳ ارائه گردیده است. براساس این نتایج، مشاهده می گردد که در تمام طرح های مخلوط با افزایش سن عمل آوری بتن، سرعت پیش روی آب جذب شده در حفرات مویینه کاهش پیدا می کند، این موضوع نشان از افزایش چگالی و بهبود ساختار بتن هم زمان با افزایش سن عمل آوری بتن می باشد که در نتیجه پرشدن حفرات مویینه توسط ژل های هیدراته تشکیل شده از فرایند هیدراتاسیون و ژئوپلیمریزاسیون می باشد. افزایش سن عمل آوری موجب بهبود فرایند هیدراتاسیون و ژئوپلیمریزاسیون می گردد و در این راستا شاهد مشارکت بیشتر ذرات سیمانی در فرایند واکنش شیمیایی و تولید ژل های هیدراته بیشتری هستیم که با توجه به نقش چسبندگی و پرکنندگی این ژل ها در مواجهه با منافذ، حفرات و ترک ها، منتج به افزایش خصوصیات دوام در بتن می گردد. بالا بودن میزان جذب آب مویینه می تواند نشانه ضعف در ساختار ماتریس سیمان پرتلند و ژئوپلیمری باشد.



شکل ۳- نتایج آزمایش جذب مویینه آب در بتن

بهترین عملکرد در جذب مویینه آب متعلق به سن عمل آوری ۹۰ روزه بتن طرح ۶ حاوی ۹۲ درصد سرباره کوره آهن گدازی، ۸ درصد نانوسیلیس و ۲ درصد الیاف پلی اولفین به میزان ۰/۰۴۹ میلی متر بر مجذور دقیقه می باشد که به میزان ۶۵ درصد بهبود نسبت به نتایج حاصل از بتن کنترل در همین سن را نشان می دهد و

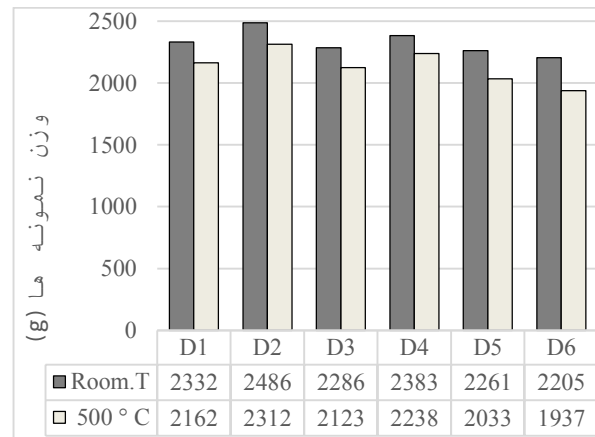
توزیع یکنواخت الیاف در ساختار ملات ژئوپلیمری در این نمونه‌ها نسبت داد.

عوامل متعدد دیگری در راستا کاهش وزن نمونه‌های بتنی تحت حرارت نقش دارند، به طوری که گزارش شده است افزایش سرعت انتقال حرارت، کاهش جرم نمونه بتنی را تشدید می‌کند، این امر به دلیل تبخیر آب آزاد و آب موجود در ناحیه انتقال بین سطحی (ITZ) می‌باشد [۴۳]. از طرفی مطالعات نشان داده است که دلیل اصلی کاهش وزن نمونه‌های بتنی با اعمال حرارت بالا به نمونه‌های بتنی، ناشی از خروج آب از بین سنگ‌دانه‌ها و خمیر سیمان است [۴۴]. در تحقیق انجام پذیرفته مهدی‌پور و همکاران، افزایش حرارت تا ۶۰۰ درجه سلسیوس موجب تشدید نرخ کاهش وزن نمونه‌های بتن پوزولانی تا ۱۲/۳۳ درصد گزارش شده است [۴۵].

#### ۴-۳- نتایج حاصل از طیف‌سنجی XRF و SEM

نتایج حاصل از انجام طیف‌سنجی فلئورسانس اشعه ایکس (XRF) بتن در جدول ۷ نشان داده شده است. نتایج حاکی از این موضوع است که سیلیس، اکسید آلومینیوم، اکسید کلسیم و اکسید سدیم به عنوان چهار عنصر اصلی با بیشترین میزان مشارکت در ترکیبات بتن ژئوپلیمری حضور دارند. روند افزایش مصرف نانوذرات سیلیس در طرح‌های مخلوط بتن ژئوپلیمری در نتایج حاصل از طیف‌سنجی XRF در جدول ۷ مشهود است، در این راستا حداکثر میزان نانوذرات سیلیس در طرح‌های مخلوط ۴، ۵ و ۶ دیده می‌شود و حداقل آن در بتن طرح ۲ مشاهده می‌گردد. حداکثر و حداقل میزان اکسید آلومینیوم موجود در ترکیب متعلق به طرح ۲ و ۱ است. حضور اکسیدهای آهن و منیزیم در محدوده ۲ الی ۷ درصد در نوسان هستند، وجود اکسیدهای پتاسیم و گوگرد در محدوده مقادیر ۱ الی ۲ درصد در تمامی ترکیبات مشهود است و حضور اکسیدهای تیتانیم، فسفر و منگنز در اغلب طرح‌های مخلوط به مقادیر زیر ۱ درصد رسیده است. میزان افت حرارتی ناشی از خروج مواد تحت حرارت در تمامی طرح‌ها تقریباً در یک رنج و در محدوده ۱۶ درصد مشاهده می‌گردد. براساس نتایج طیف‌سنجی XRF در جدول ۷ مشاهده می‌گردد که نمونه بتنی طرح ۱ شامل بتن کنترل حاوی سیمان پرتلند، دارای بیشترین میزان اکسید کلسیم (۳۷/۱۶۹٪) نسبت به سایر طرح‌های می‌باشد، درصد پایین میزان سیلیس (۱۹/۵۷۴٪) در نمونه بتنی طرح ۲ به علت عدم استفاده از

بر پایه مقاومت حرارتی استفاده گردید، در این استاندارد دمای اعمال شده به نمونه‌های بتنی تا ۱۰۰۰ درجه سلسیوس و مدت زمان اعمال حرارت یک ساعت توصیه شده است. در این راستا در تمامی طرح‌های مخلوط، ابتدا نمونه‌های بتنی (با ابعاد مکعب ۱۰ سانتی‌متر) در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه در دمای اتاق وزن گردیدند سپس نمونه‌ها به مدت ۱ ساعت درون کوره در معرض حرارت ۵۰۰ درجه سلسیوس قرار گرفتند، این عمل موجب تبخیر آب از فضا‌های مویینه و حفرات احتمالی موجود در بتن گردید، در پایان زمان حرارت و پس از رسیدن دمای نمونه‌ها به دمای اتاق، نمونه‌ها مجدداً وزن شدند و میانگین میزان کاهش وزن نمونه‌ها براساس نمودار شکل ۴ درج گردید.



شکل ۴- نتایج کاهش وزن نمونه‌ها

براساس این نتایج مشاهده می‌گردد که بیشترین و کمترین درصد کاهش وزن نمونه‌ها بعد از اعمال حرارت بالا، نسبت به دمای محیط، به ترتیب متعلق به طرح ۶ و طرح ۴ به میزان ۰/۱۲ درصد و ۰/۰۶۱ درصد می‌باشد، میزان کاهش وزن در این دو طرح به ترتیب به مقادیر ۲۶۸ و ۱۴۵ گرم در هر نمونه می‌باشد. کاهش وزن نمونه بتنی در طرح ۴ حاوی بتن ژئوپلیمری با ۹۲ درصد سرباره و ۸ درصد نانوسیلیس، به میزان ۱۶ درصد بهبود را نسبت به طرح ۱ حاوی بتن کنترل از خود نشان داده است، این امر اغلب به دلیل حضور و مشارکت ذرات نانوسیلیس در فرایند ژئوپلیمریزاسیون و نقش پرکنندگی و چسبندگی مناسب این ذرات در ژل‌های هیدراته می‌باشد که موجب پرشدن حفرات و ترک‌ها می‌گردد. وجود الیاف پلی‌اولفین در بتن طرح ۶، موجب تضعیف در نتایج حاصل از کاهش وزن نمونه‌های گردیده است. این امر را تا حدودی می‌توان به نحوه پیوند در حداصل خمیر ژئوپلیمری و الیاف پلی‌اولفین و



نانوسیلیس در طرح مخلوط بتن ژئوپلیمری می باشد در حالی که این طرح مخلوط با روند افزایش نانوسیلیس از ۴ به ۸ درصد، افزایش مقدار در طرح های ۳ و ۴ با توجه به وجود ذرات نانوسیلیس در یافته است.

جدول ۷- نتایج طیف سنجی XRF (براساس درصد)

مقادیر ماده در هر طرح							ترکیب شیمیایی	نام ماده
طرح ۶	طرح ۵	طرح ۴	طرح ۳	طرح ۲	طرح ۱			
۳۶/۸۳۴	۳۷/۰۷۶	۳۶/۳۳۱	۳۲/۰۲۶	۱۹/۵۷۴	۲۷/۱۲۲	SiO <sub>2</sub>	سیلیس	
۶/۹۱	۷/۱۲۹	۷/۰۱۳۱	۶/۷۲	۸/۰۷۳	۵/۶۳۹۵	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	اکسید آلومینیوم	
۱۵/۱۸۶	۱۵/۳۱۲	۱۵/۲۵۷	۲۳/۶۰۹	۲۶/۸۱۵	۳۷/۱۶۹	CaO	اکسید کلسیم	
۳/۰۱۹	۱۲/۶۴۹	۱۲/۸۷۲	۹/۰۱۶	۱۵/۱	۱/۱	Na <sub>2</sub> O	اکسید سدیم	
۴/۰۱۲	۳/۷۹	۳/۹۴	۳/۹۴	۵/۶۴	۷/۲۰۹۸	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	اکسید آهن	
۲/۸۹۳	۳/۱۵۲	۳/۰۱۳۳	۴/۰۱۴	۵/۰۵۱	۲/۱۱۴	MgO	اکسید منیزیم	
۱/۱۴۷	۱/۱۲۹	۱/۰۵۲۶	۱/۰۱۵	۱/۰۱۳	۰/۹۱۴۴	K <sub>2</sub> O	اکسید پتاسیم	
۱/۹۸۷	۱/۹۰۲	۲/۸۲۲	۱/۸۷۵	۱/۱۶۴	۱/۵۹۱۳	SO <sub>3</sub>	اکسید گوگرد	
۱/۲۰۱	۰/۰۳۹	۱/۱۷۳	۱/۰۸۶	۰/۹۶۱	۰/۴۷۲	TiO <sub>2</sub>	اکسید تیتانیوم	
۰/۱۵۳	۰/۱۳۹	۰/۱۳۱	۰/۱۴۴	۰/۱۷۴	۰/۱۶۳	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	اکسید فسفر	
۰/۷۱۹	۰/۶۴۹	۰/۶۸۴	۰/۶۵۵	۰/۳۹۵	۰/۰۹۱	MnO	اکسید منگنز	
۱۵/۹۳۹	۱۶/۰۳۴	۱۵/۷۱۱	۱۵/۹	۱۶/۰۴	۱۶/۴۱۴	LOI	افت حرارتی	

ژئوپلیمری شده است. تجزیه و تحلیل SEM نشان می دهد که ذرات نانو فضای خالی را پر می کند و منجر به ایجاد یکنواختی، خلاء کمتر و ماتریس ژئوپلیمری فشرده تر می شود [۴۶]. همچنین واکنش پوزولانی با تبدیل CH به C-S-H ریزساختارها را متراکم کرده و ساختار بتن را همگن می کند [۴۷]. حضور برخی از ریز ترک های موجود در بتن ژئوپلیمری را می توان به انقباض حاصل از خشک شدن ساختار، ناشی از خروج آب از منافذ مویینه بین لایه ای در ساختار ژل های هیدراته نسبت داد، البته در این راستا ترک های به وجود آمده به هنگام شکستن در نمونه برداری بتن نباید نادیده گرفته شود.

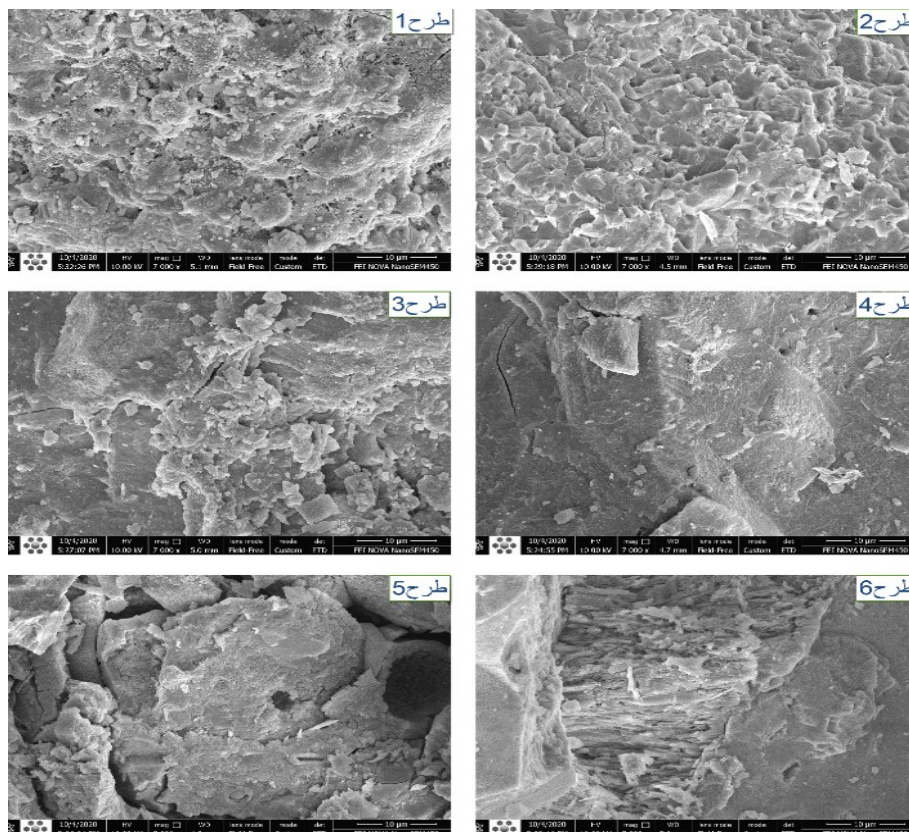
#### ۴- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر با ساخت بتن ژئوپلیمرسرباره ای حاوی نانوسیلیس در ۳ طرح مخلوط، به بررسی دوام در این نوع از بتن از طریق انجام آزمون های نفوذپذیری آب، جذب مویینه آب و بررسی کاهش وزن نمونه های بتنی پرداخته شد، به منظور ارزیابی ریزساختاری بتن در این تحقیق از طیف سنجی XRF و SEM استفاده گردید. طرح بهینه (از بین ۳ طرح مخلوط بتن ژئوپلیمری)

تصویربرداری توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) به منظور بررسی ریزساختار بتن کنترل و بتن ژئوپلیمری بر روی نمونه های بتنی در سن عمل آوری ۹۰ روز انجام پذیرفت، نتایج حاصل از تصاویر میکروسکوپی نمونه های بتن در مقیاس ۱۰ میکرومتر در شکل ۵ به نمایش در آمده است. براساس تصاویر SEM مشاهده می گردد که بیشترین حجم حفرات، منافذ و ساختار غیرهمگن متعلق به بتن طرح ۱ شامل بتن کنترل (حاوی سیمان پرتلند) می باشد، همچنین ساختار درختی و کریستال های کوچک هیدراته نشده (اغلب نواحی با رنگ سفید) در این طرح بیشتر از سایر طرح ها به چشم می خورد که نشان از مشارکت پایین ذرات سیمانی در فرایند ترکیب شیمیایی می باشد. در بتن ژئوپلیمری با افزایش مصرف نانوسیلیس در طرح ها، شاهد تراکم و انسجام بیشتر در ترکیب ملات ژئوپلیمری و کاهش در میزان حفرات و منافذ می باشیم، این امر به دلیل توسعه فرایند ژئوپلیمریزاسیون و تشکیل ژل های هیدراته بیشتر (شامل نواحی تیره رنگ) از قبیل C-S-H، A-S-H، C-A-S-H و N-A-SH در ترکیب ملات ژئوپلیمری است که موجب همگنی، اتصال سطوح شکست و تقویت نواحی انتقال بین سطحی و بین لایه ای در ماتریس سیمان

این مقاله به شرح ذیل می‌باشد.  
 - در آزمایش نفوذپذیری آب و جذب مویینه آب در بتن، افزایش سن عمل‌آوری در بتن موجب بهبود نتایج حاصله گردید، این امر در نتیجه افزایش حجم تولید ژل‌های هیدراته ناشی از فرایند هیدراتاسیون و ژئوپلیمریزاسیون در بتن هم‌زمان با افزایش طول عمر و سن عمل‌آوری در بتن است.

با انجام آزمون‌های اولیه انتخاب و با افزودن ۱ و ۲ درصد الیاف پلی‌اولفین، ۲ طرح دیگر (در مجموع ۵ طرح مخلوط از بتن ژئوپلیمری) ساخته شد و آزمون‌های ذکر شده مجدد بر روی نمونه‌ها انجام پذیرفت و نتایج حاصله با نتایج حاصل از ۱ طرح مخلوط از بتن کنترل حاوی سیمان پرتلند (در طرح ۱) مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت، اهم نتایج حاصل از تحقیق آزمایشگاهی در



شکل ۵- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی بتن

از خود نشان می‌دهد.  
 - افزودن نانوسیلیس تا ۸ درصد به ترکیب بتن ژئوپلیمری موجب بهبود نتایج در آزمایش نفوذپذیری آب و جذب مویینه آب در بتن ژئوپلیمری سرباره‌ای گردید، این عملکرد با افزایش سن عمل‌آوری نمونه‌های بتنی توسعه پیدا نموده است. به طوری که در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه، افزودن ۸ درصد نانوسیلیس به طرح ۴ بتن حاوی بتن ژئوپلیمری موجب بهبود عملکرد نفوذپذیری و جذب مویینه آب به میزان ۲۸ درصد و ۲۴ درصد نسبت به بتن ژئوپلیمری طرح ۲ (فاقد نانوسیلیس) گردیده است.  
 - افزودن الیاف پلی‌اولفین تا ۲ درصد به ترکیب بتن ژئوپلیمری سرباره‌ای (طرح ۶)، موجب بهبود نتایج حاصل از آزمون جذب

- بهترین عملکرد در نتایج آزمون نفوذپذیری آب، متعلق به سن عمل‌آوری ۹۰ روزه در طرح ۶ حاوی بتن ژئوپلیمری شامل ۹۲ درصد سرباره، ۸ درصد نانوسیلیس و ۲ درصد الیاف پلی‌اولفین، به مقدار ۱۳ میلی‌متر عمق نفوذ بوده است که نسبت به نتیجه نفوذ آب در بتن کنترل به میزان ۳۱ درصد بهبود را در همین سن از خود نشان می‌دهد.

- بهترین عملکرد در نتایج آزمون جذب مویینه آب متعلق به سن عمل‌آوری ۹۰ روزه طرح ۶ حاوی بتن ژئوپلیمری (شامل ۹۲ درصد سرباره، ۸ درصد نانوسیلیس و ۲ درصد الیاف پلی‌اولفین)، به مقدار ۰/۰۴۹ میلی‌متر بر مجذور دقیقه است که نسبت به نتیجه جذب آب در بتن کنترل حدود ۶۵ درصد بهبود را در همین سن

- [3] Amran, M., Huang, S. S., Debbarma, S., & Rashid, R. S. (2022). Fire resistance of geopolymers concrete: A critical review. *Construction and Building Materials*, 324, 126722.
- [4] Verma, M., & Dev, N. (2022). Effect of liquid to binder ratio and curing temperature on the engineering properties of the geopolymer concrete. *Silicon*, 14(4), 1743-1757.
- [5] Trivedi, A., Ojha, P. N., Singh, A., Singh, B., Bansal, S., & Sengupta, L. (2022). Experimental investigations on mechanical properties of normal and high strength high calcium geopolymer concrete. *Journal of Asian Concrete Federation*, 8(1), 16-25.
- [6] Wong, L. S. (2022). Durability performance of geopolymer concrete: A review. *Polymers*, 14(5), 868.
- [7] Rajmohan, B., Nayaka, R. R., Kumar, K. R., & Kaleemuddin, K. (2022). Mechanical and durability performance evaluation of heat cured low calcium fly ash based sustainable geopolymer concrete. *Materials Today: Proceedings*, 58, 1337-1343.
- [8] de Toledo Pereira, Diegles Simoes, et al. "Comparative analysis between properties and microstructures of geopolymeric concrete and portland concrete." *Journal of Materials Research and Technology* 7.4 (2018): 606-611.
- [9] Sunkara, Y. (2022). An Investigation on the Swelling Behaviour of Basic Oxygen Furnace Slag-Granulated Blast Furnace Slag Mixtures.
- [10] Shilar, F. A., Ganachari, S. V., Patil, V. B., Nisar, K. S., Abdel-Aty, A. H., & Yahia, I. S. (2022). Evaluation of the Effect of Granite Waste Powder by Varying the Molarity of Activator on the Mechanical Properties of Ground Granulated Blast-Furnace Slag.
- [11] Asaad, M. A., Huseien, G. F., Memon, R. P., Ghoshal, S. K., Mohammadhosseini, H., & Alyousef, R. (2022). Enduring performance of alkali-activated mortars with metakaolin as granulated blast furnace slag replacement. *Case Studies in Construction Materials*,
- [12] Xu, J., Xu, F., Wu, Y., Liu, Y., Yang, F., Jiao, Y., ... & Li, B. (2022). Investigation on properties and mechanism of non-calcined Bayer red mud-phosphogypsum cementitious binder. *Journal of Cleaner Production*, 134661.
- [13] Wang, Y., Cao, Y., Zhang, Z., Huang, J., Zhang, P., Ma, Y., & Wang, H. (2022). Study of acidic degradation of alkali-activated materials using synthetic C-(N)-ASH and NASH gels. *Composites Part B: Engineering*, 230, 109510.
- [14] Zhang, F., Li, Y., Zhang, J., Gui, X., Zhu, X., & Zhao, C. (2022). Effects of slag-based cementitious material on the mechanical behavior

مویینه آب و نفوذپذیری آب در بتن گردیده است و با افزایش سن عمل آوری نمونه‌های بتنی نتایج بهبود پیدا می‌کند. به طوری که در سن عمل آوری ۹۰ روزه، افزودن ۲ درصد الیاف پلی‌اولفین به طرح ۶ بتن ژئوپلیمری موجب بهبود عملکرد نفوذپذیری و جذب مویینه آب به میزان ۲۷ درصد و ۲۳ درصد نسبت به بتن ژئوپلیمری طرح ۴ (فاقد الیاف) گردیده است.

- بالاترین عملکرد در آزمون‌های نفوذپذیری آب (در طرح ۶)، جذب مویینه آب (در طرح ۶) و کاهش وزن نمونه‌ها (در طرح ۴) به ترتیب به میزان ۵۶، ۶۵ و ۱/۲ درصد بهبود نتایج نسبت به بتن کنترل حاصل گردید.

- بهترین عملکرد در میزان کاهش وزن نمونه‌ها، متعلق به طرح ۴ حاوی بتن ژئوپلیمری بود که به میزان ۱۶ درصد بهبود (کاهش وزن کمتر) در نتایج نسبت به بتن کنترل را به همراه داشت، وجود ۲ درصد الیاف پلی‌اولفین در طرح ۶ بتن، منجر به ایجاد ضعیف‌ترین عملکرد در کاهش وزن نمونه‌های بتنی گردید. این موضوع را می‌توان به جنس و نوع الیاف مصرفی و نحوه پیوند این نوع از الیاف در ترکیب ملات ژئوپلیمری به ویژه در نواحی انتقال بین سطحی (ITZ) در ساختار بتن نسبت داد.

- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه‌های بتنی نشان از بهبود و انسجام ماتریس سیمان ژئوپلیمری با افزودن ذرات نانوسیلیس در طرح‌های بتن ژئوپلیمری می‌باشد، این امر ناشی از تشکیل بیشتر ژل‌های هیدراته شده با حضور ذرات نانوسیلیس و نقش چسبندگی و پرکنندگی این ماده در ساختار بتن است.

- نتایج حاصل از طیف‌سنجی XRF و SEM ضمن هماهنگی با هم، در همپوشانی با نتایج حاصل از سایر آزمون‌های این پژوهش قرار داشتند.

## ۵- مراجع

- [1] Amin, M., Elsakhawy, Y., Abu el-hassan, K., & Abdelsalam, B. A. (2022). Behavior evaluation of sustainable high strength geopolymer concrete based on fly ash, metakaolin, and slag. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00976.
- [2] Saif, M. S., El-Hariri, M. O., Sarie-Eldin, A. I., Tayeh, B. A., & Farag, M. F. (2022). Impact of Ca+ content and curing condition on durability performance of metakaolin-based geopolymer mortars. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00922.

- impact test in blast furnace slag based geopolymer concrete, under high temperature. *Journal of Civil Engineering Researchers*, 4(2), 12-21.
- [26] ASTM C989/C989M-18a, Standard Specification for Slag Cement for Use in Concrete and Mortars, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, [www.astm.org](http://www.astm.org), DOI: 10.1520/C0989\_C0989M-18A
- [27] Huseien, Ghasan F., et al. "Effect of metakaolin replaced granulated blast furnace slag on fresh and early strength properties of geopolymer mortar." *Ain Shams Engineering Journal* 9.4 (2018): 1557-1566.
- [28] ASTM C1240-20, Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020, [www.astm.org](http://www.astm.org), DOI: 10.1520/C1240-20
- [29] Tajodeni, M. (2016). , In vitro evaluation of the effect of adding nanosilica with different specific surfaces on physical and mechanical parameters of soil-cement aggregates. *Sharif Journal of Civil Engineering*, 24-2(1/1), 13-22.
- [30] ASTM, C33. "Standard specification for concrete aggregates." *Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials* (2003).
- [31] ASTM D7508 / D7508M-20, Standard Specification for Polyolefin Chopped Strands for Use in Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020, [www.astm.org](http://www.astm.org), DOI: 10.1520/D7508\_D7508M-20
- [32] Alberti, Marcos G., Alejandro Enfedaque, and Jaime C. Gálvez. "Improving the reinforcement of polyolefin fiber reinforced concrete for infrastructure applications." *Fibers* 3.4 (2015): 504-522.
- [33] Pilehvar, Shima, et al. "Physical and mechanical properties of fly ash and slag geopolymer concrete containing different types of micro-encapsulated phase change materials." *Construction and Building Materials* 173 (2018): 28-39.
- [34] Dixon, Donald E., et al. "Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (ACI 211.1-91)." (1991): 1-38.
- [35] Öz, A., Bayrak, B., Kavaz, E., Kaplan, G., Çelebi, O., Alcan, H. G., & Aydın, A. C. (2022). The radiation shielding and microstructure properties of quartzic and metakaolin based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 342, 127923.
- [36] Kuang, F., Long, Z., Kuang, D., Guo, R., & Sun, J. (2022). Experimental study on preparation and properties of low content rubberized geopolymer mortar. *Construction and Building Materials*, 352, 128980.
- and heavy metal immobilization of mine tailings based cemented paste backfill. *Heliyon*, e10695.
- [15] Bai, Y., Guo, W., Wang, J., Xu, Z., Wang, S., Zhao, Q., & Zhou, J. (2022). Geopolymer bricks prepared by MSWI fly ash and other solid wastes: Moulding pressure and curing method optimisation. *Chemosphere*, 307, 135987.
- [16] Scrivener, Karen L., and R. James Kirkpatrick. "Innovation in use and research on cementitious material." *Cement and concrete research* 38.2 (2008): 128-136.
- [17] Li, Hui, et al. "Microstructure of cement mortar with nano-particles." *Composites Part B: Engineering* 35.2 (2004): 185-189.
- [18] Delavari, S., Jahanger, H., & Daneshvar, M. (2018). Comparison the Effect of Particle Tires and Powder of Worn Tires on Compressive Strength of Concrete (In Persian). *4th International Conference on Structural Engineering*. Iran, Tehran.
- [19] Xavier, C. S. B., & Rahim, A. (2022). Nano aluminium oxide geopolymer concrete: An experimental study. *Materials Today: Proceedings*, 56, 1643-1647.
- [20] Dişçi, E., & Polat, R. (2022). The influence of nano-CaO and nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and curing conditions on perlite based geopolymer concrete produced by the one-part mixing method. *Construction and Building Materials*, 346, 128484.
- [21] Mansourghanaei, M., & Mardookhpour, A. (2021). Experimentally evaluation of mechanical properties of activated alkaline slag concrete containing nanosilica and polyolefin fibers. *Asas Journal*, 23(63), 57-69.
- [22] Mansourghanaei, M., Biklaryan, M., & Mardookhpour, A. (2021). Evaluate Effect of Temperature On mechanical properties of Geopolymer Concretes blast furnace slag by using nanosilica and polyolefin fiber. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(10), 334-352. doi: 10.22065/jsce.2021.277150.2382
- [23] Mansourghanaei, M., Biklaryan, M., Mardookhpour, A. (2022). Experimental study of the effect of high temperature on the passage speed of Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) in alkaline slag concrete used in pavement. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 8(1), 119-131. doi: 10.22075/jtie.2022.25104.1572
- [24] Manssourghanaei M, biklaryan M, mardookhpour A. Evaluate Microstructure of Geopolymer Concretes Containing blast furnace slag and nanosilica. *MCEJ* 2022; 22 (4) :47-59 URL: <http://mcej.modares.ac.ir/article-16-52590-fa.html>
- [25] Mansourghanaei, M. (2022). Experimental evaluation of compressive, tensile strength and

- [37] EN, BS. "12390-8," Depth of penetration of water under pressure." *British Standards Institution* (2000).
- [38] Ahmad, Syed Ishtiaq, and Mohammad Anwar Hossain. "Water permeability characteristics of normal strength concrete made from crushed clay bricks as coarse aggregate." *Advances in Materials Science and Engineering* 2017 (2017).
- [39] Zhang, Zu-hua, et al. "Preparation and mechanical properties of polypropylene fiber reinforced calcined kaolin-fly ash based geopolymer." *Journal of Central South University of Technology* 16.1 (2009): 49-52.
- [40] ASTM, C. "1585-13 "Standard test method for measurement of rate of absorption of water by hydraulic cement concrete". *West Conshohocken, PA* (2013).
- [41] Bozkurt, Nusret, and Salih Yazicioglu. "Strength and capillary water absorption of lightweight concrete under different curing conditions." (2010).
- [42] Ramezaniapor, Aliakbar, et al. "Studying the Effect of the Amount of Source Materials and Water to Binder Ratio on Chloride Ions Ingress in Alkali-Activated Slag Concretes." (2018): 673-684.
- [43] Kanéma, M., et al. "Spalling, thermal, and hydrous behavior of ordinary and high-strength concrete subjected to elevated temperature." *Journal of Materials in Civil Engineering* 23.7 (2011): 921-930.
- [44] Rashad, Alaa M. "Metakaolin as cementitious material: History, scours, production and composition—A comprehensive overview." *Construction and building materials* 41 (2013): 303-318.
- [45] Mehdipour, Sadegh, et al. "Mechanical properties, durability and environmental evaluation of rubberized concrete incorporating steel fiber and metakaolin at elevated temperatures." *Journal of Cleaner Production* 254 (2020): 120126.
- [46] Assaedi, Hasan, et al. "Influence of nano silica particles on durability of flax fabric reinforced geopolymer composites." *Materials* 12.9 (2019): 1459.
- [47] Du, Hongjian, Suhuan Du, and Xuemei Liu. "Durability performances of concrete with nano-silica." *Construction and building materials* 73 (2014): 705-712.

## **Investigating permeability, capillary water absorption and weight loss in geopolymer concrete contains slag, nanosilica and polyolefin fibers**

**Mohammadhossein Mansourghanaei**

**Ph.D Student in Civil Engineering, Department of Civil Engineering, Chalous Branch, Islamic Azad University, Chalous, Iran.**

**Morteza.Biklaryan \***

**Department of Civil Engineering, Chalous Branch, Islamic Azad University, Chalous, Iran.**

**Alireza.Mardookhpour**

**Department of Civil Engineering, Lahijan Branch, Islamic Azad University, Lahijan, Iran.**

### **Abstract**

The environmental effects and the high consumption of fossil fuels in the production process of ordinary cement caused scientists to think of finding an alternative material for cement in concrete. In this regard, in the last few decades, geopolymer concrete production as a Novin was noticed by researchers in the construction industry, in the production of this type of concrete, aluminosilicate materials and active alkali solution replace cement and water, and they produce concrete with strength and strength beyond ordinary concrete. In this article, the durability properties of geopolymer-cement concrete containing 0-8% nano-silica and 1-2% polyolefin fibers have been investigated. Water capillary and weight loss were placed, also XRF and XRF spectroscopy were used to check the microstructure of the samples. The obtained results indicated the improvement of performance of concrete samples with the addition of silica nanoparticles and polyolefin fibers compared to the results of concrete containing Portland cement, microstructural investigations also confirmed the obtained results. The best performance in the results of water permeability and capillary absorption tests belonged to the age of 90 days of geopolymer concrete (containing 8% nanosilica and 2% fibers), which showed 56% and 65% improvement, respectively, compared to The control concrete was selected and the geopolymer concrete sample containing 92% slag and 8% nanosilica had the lowest weight loss of 6% after applying high heat.

**Keywords:** Geopolymer Concrete, Blast Furnace Slag, Nanosilica, Polyolefin Fibers, Mass Loss.

---

\* Corresponding Author: m.biklaryan@iauc.ac.ir